

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 微冷卻器之整合研究(3/3)-子計劃一：微冷卻器之熱流技術研究

計畫編號：NSC 90-2218-E-032-014

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：杜文謙 淡江大學機械工程學系

### 一、前言

迴路式熱管是由 Yu. F. Maidanik 與他的同事在 1980 年代舊蘇聯時期一起提出，由於 LHP 比一般熱管更多的優點，因此也被 NASA 的 JPL 實驗室所應用。1994 年 David A. Wolf 認為迴路式熱管結合了傳統熱管與毛細泵迴路的優點，可彌補前兩者應用上的限制[1]。直到 2002 年 NASA 與美國辛辛那提大學合作發展利用 MEMS 的技術製作微型迴路式熱管(micro-LHP)，並模擬在穩態下改變各種散熱溫度的條件，藉以分析加熱功率與 micro-LHP 飽和溫度等關係變化[2]。近年台大與俄國的 Maidanik 研究群合作，也投入 LHP 的研究[3]。

本研究利用既有的 MEMS 製程技術，研製微型迴路式熱管(Micro Loop Heat Pipe - MLHP)，測試其性能以及觀察相關現象的產生，並嘗試修改迴路架構，使整體系統更適用於微小化的結構，以及符合現有散熱需求的考量。

### 二、迴路式熱管作動原理

#### 2.1 LHP 啟動行為

以相變化為熱傳機制的元件，就有所謂的啟動行為(start-up)，也就是熱源的溫度須達到操作溫度的範圍，LHP 才會開始作動。此時管內的飽和壓力會增加，形成一股驅動力使蒸汽由蒸發區流向凝結區，其壓降關係如下列公式(2.1)

$$dP/d\bar{T}\bigg|_T(\Delta T_{wick}) = \Delta P_{cap} - \Delta P_w = \Delta P_{1-7} \quad (2.1)$$

此壓降關係就是所謂的 Clausius-Clapeyron 關係式。從公式 2.1 可知，當操作溫度愈高，所產生的飽和壓降也就愈大，

因此愈容易作動。

#### 2.2 MLHP 壓力降關係

由於 LHP 整個系統沒有可動原件，完全靠毛細力來作動，其中  $\Delta P_{cap}$  為毛細壓差是整個系統最主要的驅動力，Peterson[4]整理出三角形毛細微流道的毛細壓差為

$$\Delta P_{cap} = \frac{2\sigma \cos \beta}{w} \quad (2.2)$$

管路傳輸的壓降損失可分為主要損失(Major losses)與次要損失(Minor losses)，如果 MLHP 系統不是水平放置，則需考慮受重力所影響的壓差  $\Delta P_g$ 。

#### 2.3 LHP 補償室過冷度

LHP 補償室主要功能是迅速補充工作流體在蒸發區內被熱源蒸發後減少的量，否則會導致蒸發區產生燒乾(dry-out)的現象。然而補償室與蒸發區太接近，若中間相隔的絕熱不佳，會導致作用在蒸發區的熱源有部分的熱量會經由毛細結構回傳至補償室，進而減少了蒸發區形成蒸汽流至凝結區的熱量，稱為熱洩漏(heat-leak)。熱洩漏所產生的熱量過多，將使冷凝回流的工作流體被加熱，甚至形成蒸汽阻礙凝結區回流的工作流體順利進入蒸發區，如此整個系統將失去運作機制。

### 三、微型迴路式熱管製程與封裝

#### 3.1 MLHP 微結構製程

採用{100}的矽晶片，利用微機電製程技術製作 V 型溝槽的毛細微流道 MLHP，作出蒸發區、汽相流道、液相流道、冷凝區、補償室等元件於同一片晶圓上。再利用陽極

鍵合將矽晶片與 7740 玻璃接合。如此便可觀察整體系統的運作機制，有利於理論的分析以及最佳化的設計，如圖 3.1 所示，結合封裝後如圖 3.2 所示。

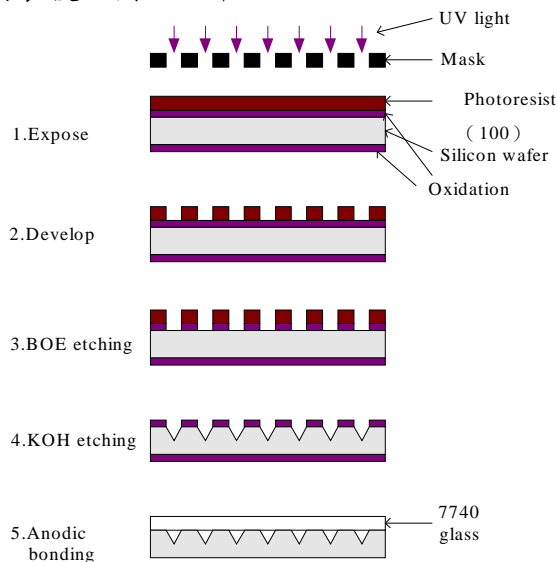


圖 3.1 MLHP 製作流程示意圖



圖 3.2 接合完成之 MLHP(60mmx33mmx 0.8mm)

### 3.2 MLHP 脫氣充填工作流體

由於非凝結性氣體對於液體在微流道中流動的影響甚鉅，所以利用真空幫浦抽氣配合加熱驅除法將 MLHP 腔體內的非凝結性氣體(空氣等無法在常溫冷凝的氣體)排出，如圖 3.3 所示。

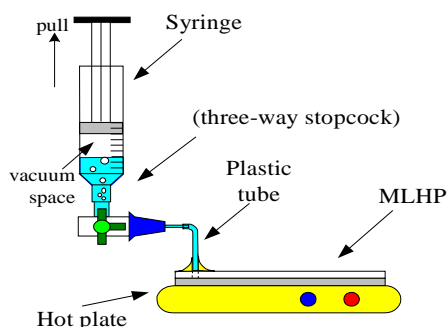


圖 3.3 真空幫浦抽氣配合加熱驅除法

### 3.3 工作流體充填量

工作流體在 MLHP 內受熱後，會有部分液體轉變成汽體，所以 MLHP 內部為汽液分

佈的狀態，因此依照 Maidanik[5]的歸納，其 LHP 內部的充填量有一關係式如下：

$$V_{wf} = \varepsilon V_w + V_{ll} + V_{cc} + V_{cch} \quad (3.1)$$

也就是工作流體的充填量  $V_{wf}$ ，應等於毛細結構的空隙  $\varepsilon V_w$ 、液相流道  $V_{ll}$ 、補償室  $V_{cc}$  與補償室核心部分  $V_{cch}$  所佔的體積，其中  $\varepsilon$  指毛細結構的孔隙度。

## 四、實驗架構

如圖 4.1 所示，在熱源部分利用陶瓷加熱片(10mmx10mm)當熱源，在加熱片背面覆蓋隔熱軟木墊，以防止熱量散失，同時在陶瓷加熱片與 MLHP 之間塗佈導熱膏，以防空氣在中間形成接觸熱阻。冷卻器部分：利用銅製的六角形接頭二個當作冷卻管路(8mmx 18mm)，管內通冷卻純水約 17°C。

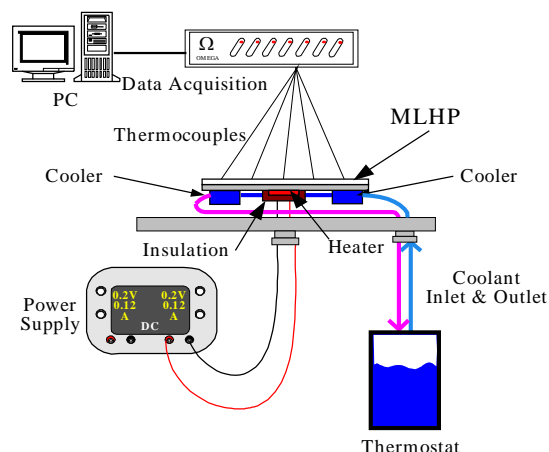


圖 4.1 測試平台示意圖

### 4.1 MLHP 性能測試

針對不同的毛細結構與不同的工作流體來作試驗，如表一所示。量測各點溫度以及蒸發區到冷凝區之間的熱阻(指汽相流道前後兩端，其距離為 40mm 長)，示意圖如圖 4.2 所示。

表一 毛細結構與工作流體列表

蒸發區毛細微流道線寬	160 $\mu$ m	130 $\mu$ m	90 $\mu$ m
水力直徑(D <sub>h</sub> )	83 $\mu$ m	67 $\mu$ m	47 $\mu$ m

微流道數	33	42	83
工作流體	D.I. water	Methanol	D.I. water Methanol

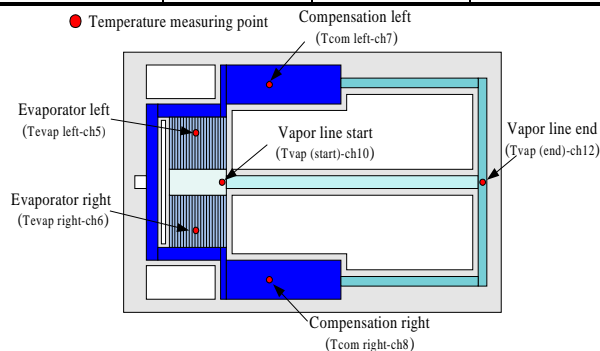


圖 4.2 MLHP 溫度量測點示意圖

## 五、結果與討論

由圖 5.1 得知，當毛細微流道的水力直徑為  $67\mu\text{m}$ ，充填純水為工作流體時，加熱功率從  $2.7\text{W}$  增加到  $3.3\text{W}$  時，可看出溫度  $T_{\text{vap}}(\text{start})$  在二十幾秒有明顯的下降趨勢，約十秒後就達到穩定的狀態，表示 MLHP 開始啟動(start-up)。

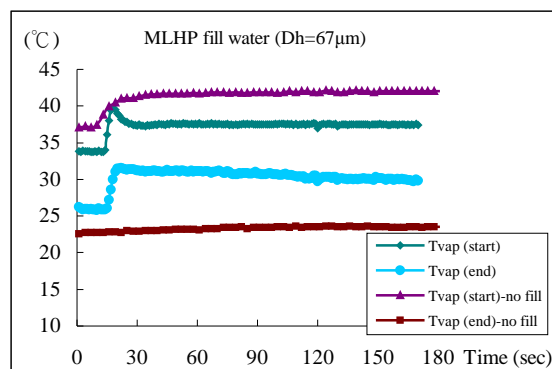


圖 5.1 溫度-時間暫態圖

### 5.1 毛細結構與工作流體之性能分析

不同水力直徑的毛細微流道，對整體傳輸效能有所差異，本研究採固定充填量來作分析。因此，影響其效能最大是毛細微流道的數量。

以下為兩種 MLHP 的性能分析：

1. 毛細微流道之水力直徑： $47\mu\text{m}$ ，工作流體：D.I. water。從圖 5.2 觀察，當功率提升至  $3.3\text{W}$  時系統開始作動，且在  $7.8\sim 12.92\text{W}$  時因熱阻很小，所以有較佳的熱傳效率，且蒸發區的溫度不超過  $80^\circ\text{C}$ ，功

率提升超過  $12.92\text{W}$  時，整個 MLHP 的作動機制就會開始失效。

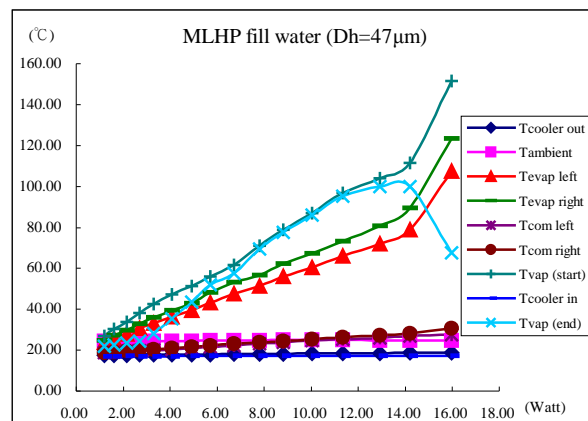


圖 5.2 溫度與功率穩態圖

2. 毛細微流道之水力直徑： $47\mu\text{m}$ ，工作流體：甲醇。圖 5.3 甲醇在  $1.20\text{W}$  開始作動，在  $2.16\sim 5.85\text{W}$  之間汽相流道兩端的溫差最小，所以熱阻也愈小，當功率超過  $5.85\text{W}$  後失效。

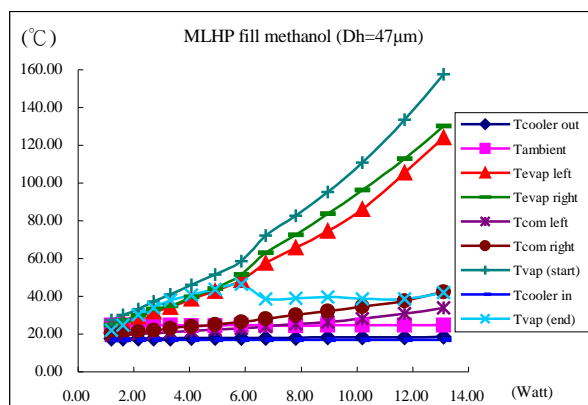


圖 5.3 溫度與功率穩態圖

### 5.2 熱阻分析比較

本實驗所探討的熱阻是針對經由蒸發區汽化的蒸汽流經汽相流道的前端與最末端之間的熱阻，實驗結果如下所述。從圖 5.4 可看出當 MLHP 內部無充填工作流體時，其汽相流道兩端間的熱阻(距離  $40\text{mm}$  長)，約在  $4\sim 7^\circ\text{C}/\text{W}$  之間，當充填甲醇後，內部機制開始運作時，熱阻就可以降至  $2^\circ\text{C}/\text{W}$  以下。從圖 5.4 可觀察出  $D_h=67\mu\text{m}$  在功率介於  $1.61\sim 4.07\text{W}$  間有較低的熱阻，最佳的熱阻發生在功率為  $2.16\text{W}$  時，其熱阻值為  $0.568^\circ\text{C}/\text{W}$ ，當  $D_h=47\mu\text{m}$  在功率介於  $2.16\sim 5.85\text{W}$  間有較低的熱阻，最佳的熱阻發生

在功率為 3.4W 時，其熱阻值為  $0.787^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

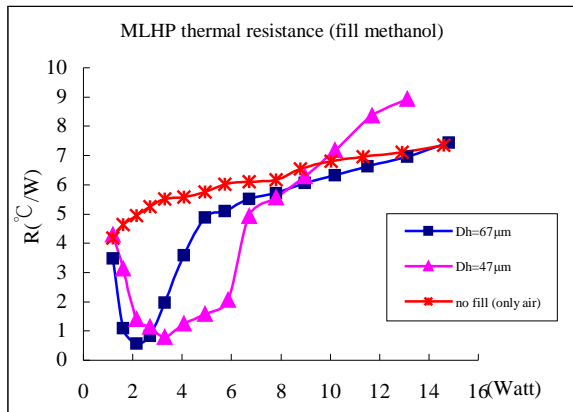


圖 5.4 熱阻與加熱功率之穩態關係圖

由上所述可知，當毛細結構的尺寸愈小其熱阻能在較大的功率下仍能保持較小的值，而且產生效果的作動區間也較大。

從圖 5.5 可觀察出當工作流體為 D.I. water 時，其熱阻的效能趨勢比甲醇更好，當  $D_h=83\mu\text{m}$  在功率介於 8.8~11.34W 間有較低的熱阻，最佳的熱阻發生在功率為 10.03W 時，其熱阻值為  $0.575^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，當  $D_h=47\mu\text{m}$  在功率介於 4.8~14.2W 間有較低的熱阻，最佳的熱阻發生在功率為 10.03W 時，其熱阻值為  $0.106^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

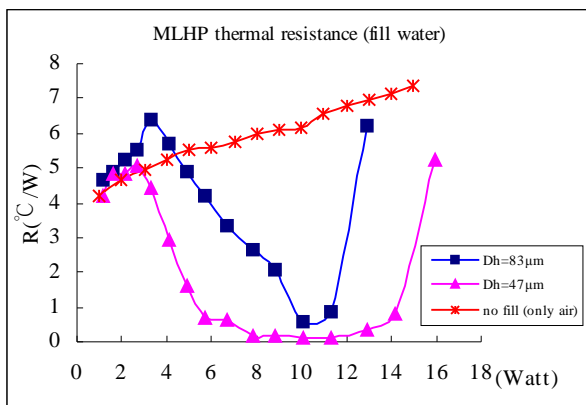


圖 5.5 充填 D.I water 時熱阻與加熱功率之穩態

由以上分析，當工作流體為 D.I. water 時，其效能更優於甲醇，尤其是當充填 D.I. water， $D_h=47\mu\text{m}$  時有著最佳的熱阻值，而且可作動的功率範圍也較甲醇寬廣。雖然甲醇能在低功率時就開始作動，不過因為其流體密度與潛熱( $h_{fg} = 1085 \text{ kJ/kg}$ , at  $70^{\circ}\text{C}$ )小於純水( $h_{fg} = 2309 \text{ kJ/kg}$ , at  $80^{\circ}\text{C}$ )，因此甲醇整

體熱含量(heat capacity)較低便不足以提供較高功率時所需求的高熱傳輸量。

## 六、結論

本研究主要在探討迴路式熱管微小化並製作於同一平面上的可行性，由於國內外並沒有多少相關研究，因此本研究一開始最大的挑戰就是如何設計 MLHP 的結構外型。最後經試驗，發現製作 MLHP 於同一平面仍是可行的，但由於整片晶片會快速導熱，因此必須將 MLHP 部分地方利用雙面蝕刻蝕穿，並作絕熱處理，同時因為所製作的 MLHP 其毛細結構採用微流道方式設計，而微流道本身材質是矽質結構，所以熱傳導率很好，因此會產生過多的熱洩漏於補償室裡，因此更改傳統設計理念，將冷卻器直接置於補償室下作冷卻，並將汽相流道與液相流道直接連接，如此一來，補償室內的液體就能保持一定的過冷度，使整個系統能夠作動。

## 七、參考文獻

1. David A. Wolf et al, Loop Heat Pipe - Their Performance and Potential, Dynatherm Corporation Inc, SAE Technical Paper No.941575, 1994
2. Jake Kim and Eric Golliher, steady State Model of a Micro Loop Heat Pipe, 8<sup>th</sup> IEEE SEMI-THERM Symposium, pp.137~144 2002
3. 陳泰宇，迴路式熱管製造與性能測試，碩士論文，國立台灣大學機械工程學研究所，2001
4. G. P. Peterson, AN INTRODUCTION TO HEAT PIPES, A Wiley- Interscience Publication, Canada, pp48,1994
5. Yu. F. maidanik, LOOP HEAT PIPES TECHNOLOGY, 2000 年太陽能科技與產業發展研討會，2000